

# 水面无人艇模糊近域图避障方法研究

王敏捷, 张汝波

(哈尔滨工程大学计算机科学与技术学院, 哈尔滨 150001)

**摘 要:** 针对复杂海洋环境下水面无人艇(USV)的危险规避问题, 介绍一种基于局部环境信息感知的避障算法——近域图(ND)法。结合 USV 高速的特性及 ND 法在速度控制上的跳跃性, 采用模糊理论平滑速度输出, 对 ND 法进行改进。在速度控制中加入与周围障碍物距离相关的动态系数, 从而减小 USV 自身惯性带来的危险规避动作误差, 提高了其安全性。VxWorks 系统下的仿真结果表明, 改进的模糊 ND 法能够使 USV 在复杂的环境下准确、快速地躲避障碍物并到达目标点。

**关键词:** 近域图法; 水面无人艇; 模糊规则; 避障; 轨迹规划; 惯性处理

## Research on Fuzzy ND Obstacle Avoidance Method of Unmanned Surface Vessel

WANG Min-jie, ZHANG Ru-bo

(College of Computer Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**【Abstract】** Aiming at the obstacle avoidance problems of the Unmanned Surface Vessel(USV) in complex marine environment, an algorithm of obstacle avoidance based on the perception of local environment——Nearness Diagram(ND) method is introduced. Combining with the characteristics of USV's high-speed and the jumping on speed control of ND method, this paper proposes fuzzy theory to smooth the output of speed to improve the ND method. The improved method reduces errors of dangerous avoid action caused by inertia of the USV, and improves its security. Simulation results on VxWorks system show that the improved fuzzy ND method enables USV to reach the target point and avoid obstacles more accurately and quickly in complex environment.

**【Key words】** Nearness Diagram(ND) method; Unmanned Surface Vessel(USV); fuzzy rule; obstacle avoidance; track planning; inertial processing

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2012.21.044

### 1 概述

水面无人艇(Unmanned Surface Vessel, USV)是一种无人操作的水面舰艇, 目前已有多种型号用于各个领域<sup>[1]</sup>。USV 的移动规划是当前研究热点, 其运动指令主要包括运动方向和速度的控制。目前常用规划算法和实时避障算法获得运动指令。规划算法在获取整体环境信息的前提下, 通过相关算法得到机器人当前所在点到目标点的一条无碰撞路径<sup>[2-3]</sup>。然而在动态环境中, 全局规划算法产生的运动轨迹往往是不可靠的, 需要进行二次规划提高精确度, 其时间复杂度较高。实时避障算法通过实时获取周围环境信息, 产生移动指令, 使机器人向着最终目标方向前进<sup>[4-5]</sup>。实时避障算法只选取环境中的小部分信息作为产生移动指令的参考, 可能陷入局部最优的陷阱。

近域图(Nearness Diagram, ND)法获取周围环境信息, 通过实时避障算法产生移动指令<sup>[6]</sup>。针对 USV 高速行驶时的特点, ND 法对 USV 移动速度的控制具有跳跃性, 常使得 USV 因为速度过快或过慢而陷入危险状态, 本文通

过引入模糊规则, 利用规则间的模糊连接性, 得到速度的折中选择, 从而获得速度的改善控制, 改进后的模糊 ND 算法在 USV 航行模拟环境中得到了验证。该算法对角度和速度控制更平滑, 同时加入与周围障碍物距离相关的动态系数  $\alpha$ , 在一定程度上减小了 USV 自身惯性带来的危险规避动作误差, 使机器人能够更好地适应复杂的环境。

### 2 ND 法介绍

ND 法通过提取周围环境信息来描述障碍物区域和自由行走区域, 然后根据探测范围内障碍物分布情况判断机器人的安全状态, 最后机器人根据所处的安全状态产生移动指令。

#### 2.1 ND 法对环境信息的提取和分析

ND 法对环境信息的提取分为 3 步: 首先利用可用信息构建 2 个近域图: 中心点近域图(Nearness Diagram from the Central Point, PND)和机器人边界近域图(Nearness Diagram from the Robot, RND); 然后通过分析 PND, 获取环境中障碍物和可选路径的相关信息; 最后通过对 RND

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(61100005)

**作者简介:** 王敏捷(1986—), 男, 硕士, 主研方向: 机器智能, 机器感知; 张汝波, 教授、博士生导师

**收稿日期:** 2011-11-09

**修回日期:** 2012-01-05

**E-mail:** wmj0095@163.com

的分析, 评估机器人的安全状态。ND 法用扇形表示周围的环境, 建立 PND 和 RND, 周围环境表示如图 1 所示。

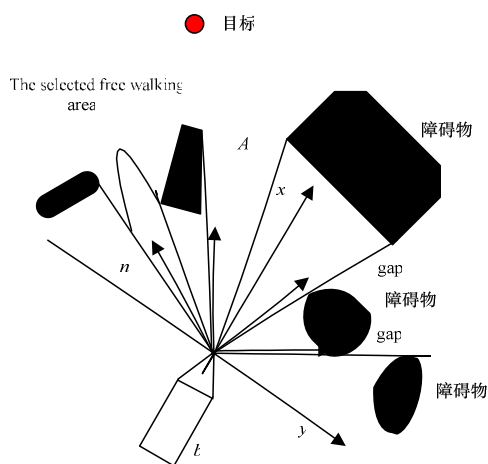


图1 环境建模、探测分析及目标扇区选择示意图

在图 1 中,  $A$  表示机器人所在的全局环境, 点  $b \in A$  为机器人所在点, 将机器人质点化, 表示扇区的中心。在 USV 上  $b$  点为前端声纳所在位置,  $n$  表示扇区的数目, 可根据具体的实验环境自动调节。

**定义 1(PND)** 各扇区内机器人周围障碍物到其物理中心点的距离<sup>[6]</sup>。

**定义 2(RND)** 各扇区内机器人周围障碍物到其物理边缘的距离<sup>[6]</sup>。

## 2.2 基于 PND 和 RND 的安全状态和方向规划分析获取

周围环境中各种因素的拓扑结构在一定周期内是不变的。首先分析探测范围内没有遇到障碍物的情况, 此时 PND 为 0; 然后根据相邻 PND 之差的绝对值是否大于由经验得到的机器人穿插距离, 获得机器人移动路径可选扇区, 即周围环境中 USV 可选的自由移动空间区域。

通过对各扇区 RND 大小分析可以得到机器人安全状态的评估。文献[6]将机器人的安全状态分为 5 类: 2 种低安全状态和 3 种高安全状态。对于机器人所处的安全状态, 结合 PND 信息, 通过移动准则找出的距离目标点最近的无障碍物扇区即为机器人下一时刻的移动扇区, 即机器人的移动方向。

## 2.3 基于安全状态的速度规划获取

ND 法中对机器人速度的控制较简单, 文献[6]对速度控制只有高速和低速之分。当机器人处于高安全状态时, 采用高速行驶; 处于低安全状态时, 采用低速行驶。高低速度分别表示为:

$$\text{高速度: } v = v_{\max} \times \text{abs}(1 - \theta/(\pi/2))$$

$$\text{低速度: } v = v_{\max} \times \left(\frac{d_{\text{obs}}}{d_s}\right) \text{abs}\left(1 - \frac{\theta}{\pi/2}\right)$$

其中,  $v_{\max}$  为机器人移动的最大速度(线速度);  $d_{\text{obs}}$  为机器人周围障碍物与机器人的距离;  $d_s$  为机器人的安全距离, 可由实验环境和人为经验设定;  $\theta \in [-\pi/2, \pi/2]$  为实验参数变量。在这种策略控制下, 机器人以最大的速度前进, 遇到障碍物骤然减速, 直到通过障碍物区域。

## 3 改进的模糊 ND 方法

ND 法由于在速度控制中只是根据障碍物的距离信息获得速度的高低等级, 因此在 USV 海面危险规避这一特殊应用中存在速度跳变缺陷, 本文对该算法在速度控制上做了改进。主要根据 USV 的特性和海面环境的特殊性, 利用相应的控制策略, 建立输入输出模糊语言集合和模糊控制规则, 以改进对速度的控制。

### 3.1 USV 速度模糊控制器的设计

USV 的探测系统能够获得前方 500 m、180°环视角的环境信息, 主要包括障碍物的距离和方向信息。在 USV 航行过程中, 其探测系统根据获得数据和自身的运动状态实时修改航行动作, USV 的危险规避模糊控制模型如图 2 所示。

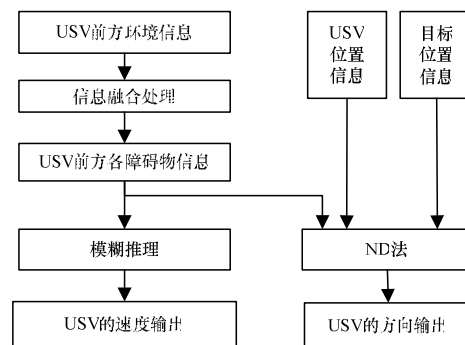


图2 USV 危险规避模糊控制模型

### 3.2 USV 相关变量模糊化

已知 USV 在全局区域中的起始点为  $p_s$ , 全局区域中的目标点为  $p_g$ , USV 获取周围环境信息定义为 INF, 由障碍物的信息条件推出模糊推理的输出量: USV 的速度控制变量  $USVv$ 。

以 USV 艇首方向为  $x$  轴, 其重心为原点,  $y$  轴指向无人艇的右舷建立局部坐标系。实验中 USV 的移动速度为 0~25 m/s。分别对其进行量化:

(1)对探测障碍物距离  $d$  的量化: 当  $0 < d < 100$  m, 等级为 0; 当  $100 \text{ m} < d < 200$  m, 等级为 1; 当  $200 \text{ m} < d < 300$  m, 等级为 2; 当  $300 \text{ m} < d < 400$  m, 等级为 3; 当  $400 \text{ m} < d < 500$  m, 等级为 4。设距离信息的论域为  $D$ , 则有  $D = \{0, 1, 2, 3, 4\}$ 。

(2)对障碍物所在方向  $\theta$  的量化: 当  $-90^\circ < \theta < -45^\circ$  时, 等级为 -2; 当  $-45^\circ < \theta < -15^\circ$  时, 等级为 -1; 当  $-15^\circ < \theta < 15^\circ$  时, 等级为 0; 当  $15^\circ < \theta < 45^\circ$  时, 等级为 1; 当  $45^\circ < \theta < 90^\circ$  时, 等级为 2。设障碍物所在方向的论域为  $L$ 。则  $L = \{-2, -1, 0, 1, 2\}$ 。

(3)对速度  $v$  的量化: 当  $0 < v < 1$  m/s 时, 等级为 0; 当  $1 \text{ m/s} < v < 5$  m/s 时, 等级为 1; 当  $5 \text{ m/s} < v < 10$  m/s 时, 等级为 2; 当  $10 \text{ m/s} < v < 15$  m/s 时, 等级为 3; 当  $15 \text{ m/s} < v < 20$  m/s 时, 等级为 4; 当  $20 \text{ m/s} < v < 25$  m/s 时, 等级为 5。设速度  $v$  的论域为  $V$ , 则有  $V = \{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$ 。

描述输入变量  $d$  的语言值模糊子集为: {危险, 近, 较近, 适中, 远}, 采用如下简记形式:  $Da$ =危险,  $Cl$ =近,

$Nr$ =较近,  $Mi$ =适中,  $Fa$ =远。图 3 给出了变量  $d$  的隶属度函数曲线。

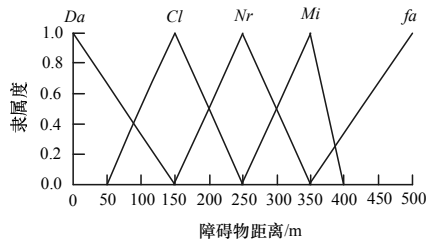


图 3 变量  $d$  的隶属度函数曲线

描述输入变量  $\theta$  的语言值模糊子集为: {极偏左, 偏左, 正中, 偏右, 极偏右}, 采用如下简记形式:  $VL$ =极偏左,  $L$ =偏左,  $C$ =正中,  $R$ =偏右,  $VR$ =极偏右。图 4 给出了变量  $\theta$  的隶属度函数曲线。

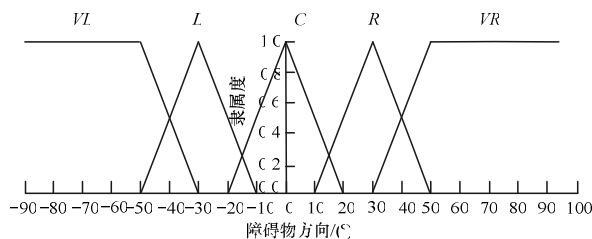


图 4 变量  $\theta$  的隶属度函数曲线

描述输出变量  $v$  的语言值模糊子集为: {慢速, 较慢速, 适中速度, 较快速, 快速, 全速}, 采用如下简记形式:  $LV$ =慢速,  $SV$ =较慢速,  $AV$ =适中速度,  $QV$ =较快速,  $MV$ =快速,  $FV$ =全速。表 1 给出了变量  $v$  的隶属度。

表 1 输出变量  $v$  的隶属度

语言变量	速度 $v$ 的量化等级					
	0	1	2	3	4	5
$LV$	1.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0
$SV$	0.5	1.0	0.5	0.0	0.0	0.0
$AV$	0.0	0.5	1.0	0.5	0.0	0.0
$QV$	0.0	0.0	0.5	1.0	0.5	0.0
$MV$	0.0	0.0	0.0	0.5	1.0	0.5
$FV$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	1.0

### 3.3 USV 危险规避速度 $v$ 模糊控制规则

模糊控制规则的设计是 USV 危险规避控制的关键<sup>[7-8]</sup>。根据模糊逻辑推理的相关理论及控制策略, 规定 2 个定性输入变量( $d, \theta$ )和一个定性输出变量( $v$ )。整个控制方式的控制策略是: “探测周围环境-输出动作(USV 的速度和方向)-探测周围环境”。USV 的避障规则如表 2 所示, 其中,  $d$  表示 USV 与障碍物的距离,  $\theta$  表示无人艇前方障碍物所在方向, 速度  $v$  表示模糊规则的输出。

表 2 USV 的避障规则

$\theta$	$d$				
	$Da$	$Cl$	$Nr$	$Mi$	$Fa$
$VL$	$LV$	$AV$	$QV$	$MV$	$FV$
$L$	$LV$	$SV$	$SV$	$AV$	$QV$
$C$	$LV$	$LV$	$SV$	$SV$	$AV$
$R$	$LV$	$SV$	$SV$	$AV$	$QV$
$VR$	$LV$	$AV$	$QV$	$MV$	$FV$

本文采用加权平均值方法得到模糊量  $v$  精确化值, 即产生速度  $v$  的量化等级内的数值, 以隶属度为权重系数求得的加权平均值即为输出速度精确值。

$$V_{\text{fuzzy}} = \frac{\sum_i \mu_i(v_i) \times v_i}{\sum_i \mu_i(v_i)} \quad (1)$$

其中,  $v_i$  为在量化等级  $i$  下随机获取的速度值;  $\mu_i(v_i)$  表示速度量化等级  $i$  的隶属度, 由表 1 获得。

### 4 USV 危险规避中的惯性处理

在海面复杂环境中, USV 处于无限流场中做平面运动, 自身具有较大的惯性, 常使得 USV 在进行危险规避时出现较大误差, 导致危险规避失败。对此, 本文在对速度进行模糊处理后, 对其增加一个与周围障碍物距离相关的动态系数  $\alpha$ , 其大小与 USV 离最近障碍物的距离呈反比, 这样 USV 可自适应地调整速度的输出。当距离趋近于 0 时, 通过系数  $\alpha$  可得 USV 的速度也趋向于 0, 即:

$$\begin{cases} V_{\text{out}} = \alpha \times V_{\text{fuzzy}} \\ \alpha = 1 / (1 + (1 / D_{\text{obs}})^{1/2}) \\ D_{\text{obs}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_{\text{obs}} \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $d_{\text{obs}}$  为 USV 前方各障碍物到无人艇的距离。由式(2)可知, USV 在接近障碍物的过程中, 速度逐渐减小, 并且随着离障碍物的距离越来越近, 速度递减得越快。此方法可以在一定程度上减小 USV 由自身惯性带来的危险规避动作误差。

### 5 模糊 ND 法的应用与效果分析

#### 5.1 ND 法在 USV 危险规避中的应用

将 ND 法应用于 USV 的危险规避中, 对算法中相关的参数值进行了修改和设定。并在 VxWorks 操作系统下进行了仿真。其中, 航行的起点为局部环境的左下方, 目标点为局部环境的右上角位置。仿真结果如图 5 所示, 可以看出, 该算法在 USV 危险规避中方向的选择很准确, 但是由于速度控制出现跳变, 影响轨迹规划, 因此 USV 因自身的惯性进入障碍物区域中, 或从障碍物边缘穿插行驶, 甚至撞上障碍物。该算法在 USV 海面避障中的应用有待于进一步改进。

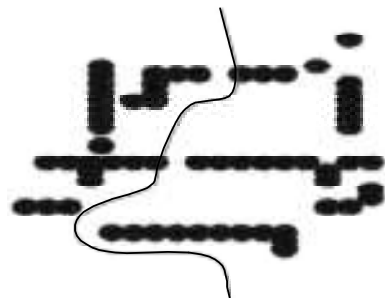


图 5 ND 法在 USV 危险规避中的仿真结果

#### 5.2 改进模糊 ND 法的应用效果分析

本文采用模糊规则对 ND 算法中的速度控制加以改进, 提高了 USV 运动路径的平滑性, 图 6、图 7 显示了在

相同环境中, 模糊 ND 算法和 ND 算法在角度和速度控制上的规划对比。

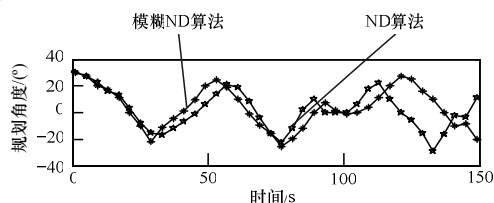


图6 模糊ND算法与ND算法规划角度对比

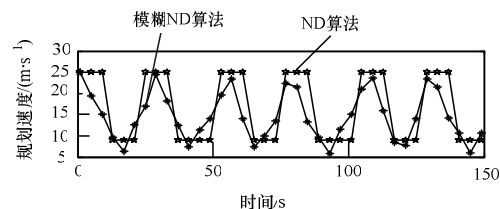


图7 模糊ND算法与ND算法规划速度对比

从图6中可以看出, 改进后的方法在角度规划上稍稍有所平滑。图7显示了速度跳变得到了明显改善, 数据间的变化得到较好平滑, 有利于 USV 的物理实现。改进后的算法将 USV 移动控制中的最大速度跨度(2次规划速度差的绝对值)从 10.32 m/s 降低到 2.65 m/s, 跨度均值从 7.64 m/s 降低到 3.84 m/s; 最大角度跨度(2次规划角度差的绝对值)从 15.32°降到 10.04°, 跨度均值从 13.78°降到 5.49°。经过规划, USV 进入障碍物区域中, 陷入危险境地的概率得到减小。危险规避结果如图8所示。

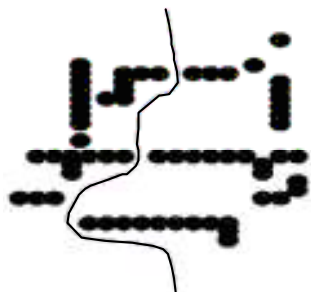


图8 基于模糊ND算法的USV危险规避结果

## 6 结束语

USV 高速行驶时 ND 法对其移动速度控制具有跳跃

性, 使 USV 的移动出现大幅度摇摆, 容易陷入危险的状态, 为此, 本文通过引入模糊理论, 利用模糊规则间的模糊连接性得到速度的折中选择, 从而获得对速度的精确控制。改进算法的有效性在 USV 航行模拟环境中得到了验证。本文提出的动态系数  $\alpha$  在一定程度上减小了 USV 因其自身惯性带来的危险规避动作误差, 使 USV 能够更好地适应复杂的海洋环境。

## 参考文献

- [1] 徐国华. 智能水下机器人自救模糊专家系统研究[J]. 中国造船, 2004, (12): 271-275.
- [2] 徐璐, 陈阳舟, 居鹤华. 基于动态行为控制的移动机器人自主避障[J]. 计算机工程, 2007, 33(14): 180-182.
- [3] Xiong Ying, Xiao Shide, Zha Feng. An Avoiding Obstacle Algorithm of Mobile Robot Under Complex Unknown Environments[C]//Proc. of MACE'11. Hohhot, China: [s. n.], 2011: 1019-1022.
- [4] Abbasi M, Danesh M, Ghayour M. A Path Fuzzy Planner for Autonomous Underwater Vehicles to Avoid Moving Unknown Obstacles[C]//Proc. of ICMA'10. Xi'an, China: [s. n.], 2010: 1264-1269.
- [5] Guo Tongying, Zheng Chunhui, Du Zhenjun, et al. Research on Obstacles Avoidance Technique of Mine Exploration and Rescue Robot Based on Fuzzy Reasoning[C]//Proc. of FSKD'09. Tianjin, China: [s. n.], 2009: 396-399.
- [6] Minguez J, Montano L. Nearness Diagram Navigation: A New Real Time Collision Avoidance Approach[C]//Proc. of IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. [S. l.]: IEEE Press, 2000: 2094-2100.
- [7] Kundu S, Dayal R P. A Fuzzy Approach Towards Behavioral Strategy for Navigation of Mobile Agent[C]//Proc. of INTERACT'10. Chennai, India: [s. n.], 2010: 292-297.
- [8] 杨晶东, 洪炳焰, 朴松昊. 基于模糊行为融合的移动机器人避障算法[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2008, 36(增刊): 135-138.

编辑 张正兴

(上接第163页)

## 参考文献

- [1] Donoho D L. Compressed Sensing[J]. IEEE Trans. on Information Theory, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [2] Chen S, Donoho D L, Saunders M A. Atomic Decomposition by Basis Pursuit[J]. SIAM Review, 2001, 43(1): 129-159.
- [3] Mallat S, Zhang Z. Matching Pursuits with Time-frequency Dictionaries[J]. IEEE Trans. on Signal Processing, 1993, 41(12): 3397-3415.
- [4] Vore R D, Temlyakov V. Some Remarks on Greedy Algorithms[J]. Adv. Comput. Math., 1996, 5(1): 173-187.
- [5] Pati Y C, Rezaiifar R, Krishnaprasad P S. Orthogonal Matching Pursuit: Recursive Function Approximation with Applications to Wavelet Decomposition[C]//Proc. of the 27th Annual Asilomar Conference in Signals, Systems, and Computers. Los Alamitos, USA: IEEE Press, 1993.
- [6] Sun Jun, Feng Bin, Xu Wenbo. Particle Swarm Optimization with Particles Having Quantum-behavior[C]//Proc. of Congress on Evolutionary Computation. [S. l.]: IEEE Press, 2004.
- [7] Adelino R, Silva F D. Atomic Decomposition with Evolutionary Pursuit[J]. Digital Signal Processing, 2003, 13(2): 317-337.
- [8] 焦李成, 杜海峰, 刘芳, 等. 免疫优化计算、学习与识别[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [9] 陈宝林. 最优化理论与算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.

编辑 索书志

